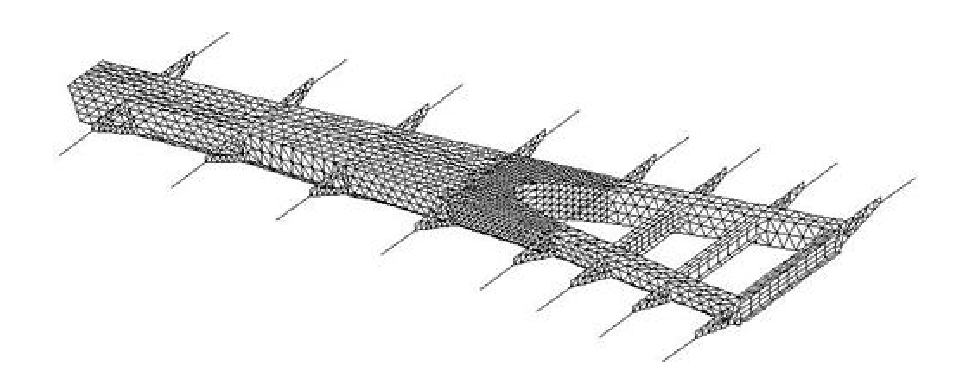
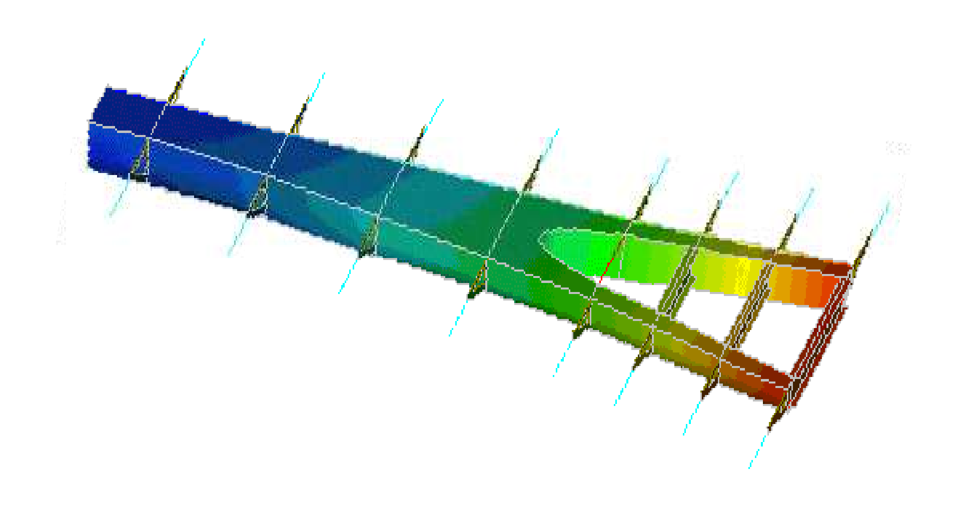
GAVIN Laurent

KLEHAMMER Jérémie





PROJET DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE : DECOUVERTE DE CESAR-LCPC SOFTWARE ET MODELISATION DE STRUCTURES.



Professeur encadrant : **Mr Cyrille CHAZALLON**

Septembre 2008 / Janvier 2009



Sommaire



Introduction

Au cours de ce projet de recherche technologique, nous avons choisi de découvrir le logiciel de modélisation CESAR-LCPC permettant de résoudre des problèmes de génie civil 2D ou 3D. Ce choix a été motivé par la perspective d'apprendre à manipuler un logiciel bénéficiant d'une interface graphique, de capacités de maillage élaborées, mais surtout d'un large panel de lois de comportement.

Le logiciel César LCPC (version4) nous est mis à disposition à l'école, accompagné de succincts documents de présentation. Cependant aucun autre document d'utilisation n'est disponible, nous avons dû nous familiariser avec le logiciel par tâtonnement en suivant les conseils de M. Cyrille Chazallon. De par cette faible documentation la prise en main s'est révélée laborieuse, nous rappellerons que le logiciel n'a fonctionné que partiellement (impossibilité de lancer de calculs) au début, et que l'on est limité à des maillages basiques.

De part ces difficultés non résolues à ce jour nous avons dû limiter notre étude à des sujets simples sans pouvoir explorer les nombreuses capacités qu'offre CESAR-LPC.

Ce rapport sera articulé de la manière suivante : dans un premier temps nous présenterons le logiciel et ses applications, avant de développer nos modélisations sous CESAR puis enfin nous décrirons les documents de support de cours réalisés en vu de former les futurs étudiants.



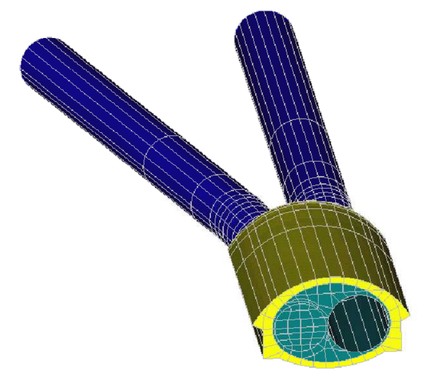
I. Présentation du logiciel

CESAR-LCP est un code de calcul par la méthode des éléments finis dédié au génie civil. Le logiciel permet d'assister les ingénieurs, de faciliter la compréhension de phénomènes complexes mais aussi concevoir et dimensionner des ouvrages. Il s'appuie sur l'analyse des phénomènes et leur représentation physicomathématique, sur la résolution numérique des équations correspondantes et sur la confrontation avec l'expérience. Le logiciel est développé par le laboratoire des Ponts et Chaussées depuis une vingtaine d'années.

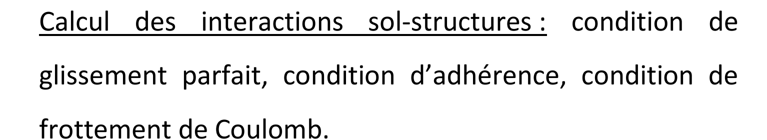
1. Applications

CESAR-LCPC

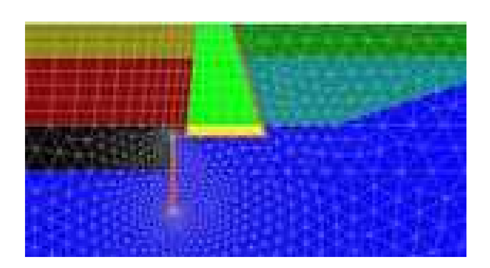
Calcul des ouvrages enterrés : conception des sections 2D standards ou des intersections de galeries en 3D, modélisation de fronts de taille. Génération des phases de construction, taux de déconfinement …



Maillage d'intersection de deux galeries

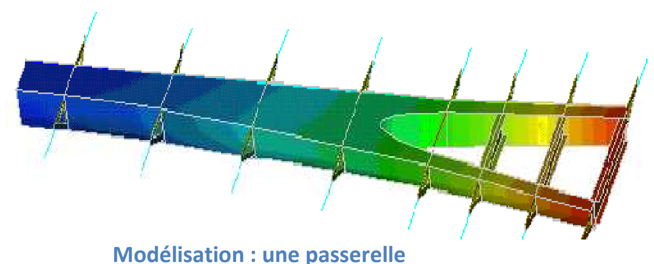


Calcul des interactions sol-structures : condition de glissement parfait, condition d'adhérence, condition de frottement de Coulomb.



Mur de soutènement

Calculs des ouvrages d'art : analyse statique comportement des matériaux linéaires et non-linéaires. Recherche des modes de flambement. Analyse dynamique, superposition modale, réponse à une sollicitation harmonique.



Modélisation : une passerelle

Problèmes d'hydrologie : Propriété des écoulements en milieux poreux, calcul de la position de la surface libre, résolution d'écoulement transitoire ou permanent en milieux poreux ou non. Analyse de nappes aquifères.



Charge hydraulique au front de taille d'un tunnel



2. Principales caractéristiques

Fonctionnalités de maillage puissantes

- Maillages réguliers par super-éléments
- Extrusion, translation, symétrie, rotation…
- Maillage tétraédrique de volume quelconque par algorithme TetMesh.

Bibliothèque d'éléments

- Volumes tétra-, hexa- et pentaédriques.
- Éléments de structures : barres, poutres (multifibres),
- coques (multicouches).
- Éléments d'interface et de contact à comportement adhérent, glissant ou frottant.
- Éléments de renforcements homogénéisés.

Lois de comportement

- Sols et roches
  - Mohr-Coulomb, Drucker-Prager
- Béton
  - Critère parabolique,
  - Willam-Warnke.
- Acier
  - Von Mises.

Chargements

- Forces nodales
- Pression uniforme ou non
- Pressions hydrostatiques
- Chargements différés
- Chargements initiales

Interaction sol structure

- Non-interpénétration
- Frottement de Coulomb
- Limite en traction

Gestion simple du phasage – chargements spécifiques adaptés

- Initialisation automatique des contraintes d'origine géostatique.
- Gestion simple des ajouts et retraits de groupes d'éléments.
- Application automatique des forces de déconfinement.
- Simulation des effets différés de type visco-élastique, du gonflement d'une argile, ...

Outils de visualisation modernes

- Vue 3D interactive avec déplacement, rotation et zoom dynamique.
- Affichage complet ou partiel du modèle.
- Transparence à intensité modulable.

Outils d'analyse des résultats complets

- Déformée.
- Interrogation des résultats aux nœuds et export.
- Isovaleurs :



II. Nos études

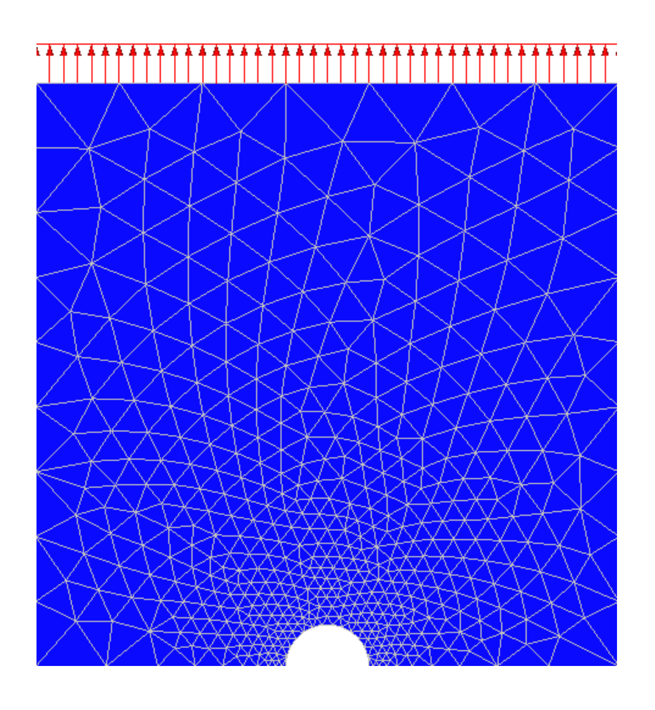
Afin de nous familiariser avec l'ergonomie du logiciel et ses principales fonctionnalités, nous avons au départ modélisé des éléments simples : plaque trouée en traction, plaque avec inclusion infinie en traction, essai brésilien.

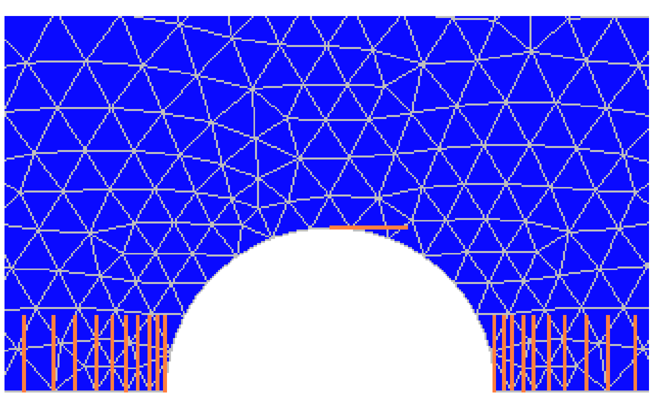
Puis pour prendre en compte la fonction « phasage » nous avons modélisé le comportement d'une palplanche dans un sol et étudié les répercussions d'excavations successives sur le modèle.

1. Plaque infinie trouée.

Description et maillage.

L'objet de l'étude est une plaque en acier percée en son centre et soumise à un effort de traction sur ses extrémités. Nous cherchons à déterminer l'impact du trou sur les réponses mécaniques de la plaque.





1. Détails des conditions aux limites

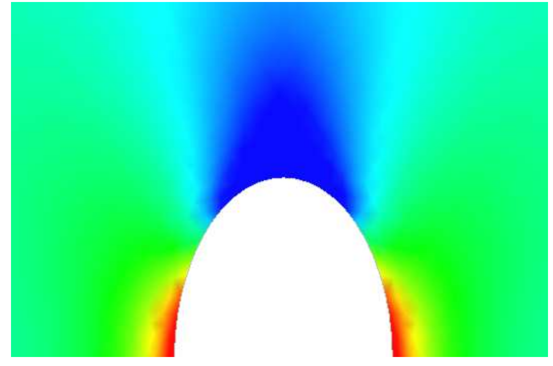
La plaque étant symétrique nous avons pu limiter la modélisation à un seul côté (on aurait encore pu effectuer une symétrie suivant la hauteur). Pour cela la partie inférieure de la plaque est bloquée en translation verticale (pour représenter la continuité du matériau). Un point de l'axe de symétrie vertical est aussi bloqué, afin d'éviter la formation d'un pivot.

Etant donné le but de cette simulation, un maillage très fin sera effectué à la périphérie directe du trou, maillage qui sera de plus en plus grossier en s'éloignant de cette zone. En effet, il est inutile de mailler finement l'ensemble de la pièce, car cela aurait pour seules conséquences de ralentir voire de fausser les calculs.



Visualisation des contraintes :

On peut visualiser des contraintes de deux manières différentes, par « mappings » et par graphiques.



2 Détail des sollicitations en traction.

On observe une importante déformation du trou, c'est-à-dire un allongement suivant l'axe vertical et un raccourcissement suivant l'axe horizontal.

Dans la représentation ci contre, nous avons aussi choisit de mettre en évidence un état de contrainte (S1) ; on constate une importante traction dans la partie inférieure du trou (zones en rouge). Le sommet du trou n'est quasiment pas sollicité en traction. Le reste de la plaque est lui soumis à un léger effort de traction.

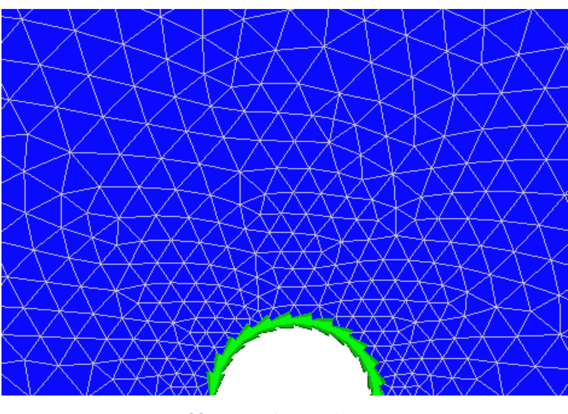


3 Plaque classique en traction

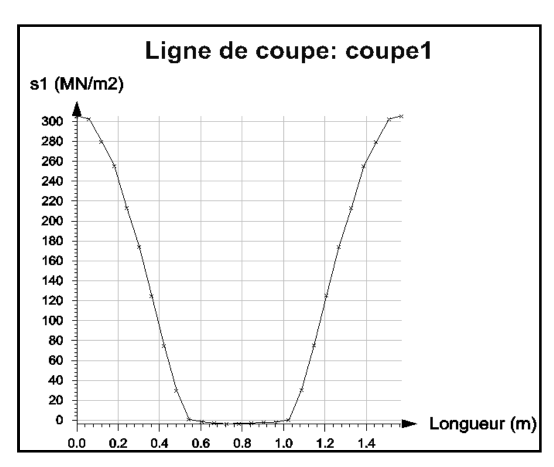
Dans le cas d'une plaque non trouée (ci contre), cette contrainte est concentrée sur les extrémités de la zone de traction.

Il est donc évident que le trou implique une redistribution totale des efforts, il a donc modifié les paramètres de comportement mécanique du modèle.

Il apparait clairement ici que les extrémités du trou sont les zones les plus sollicitées.



4 Définition ligne de coupe



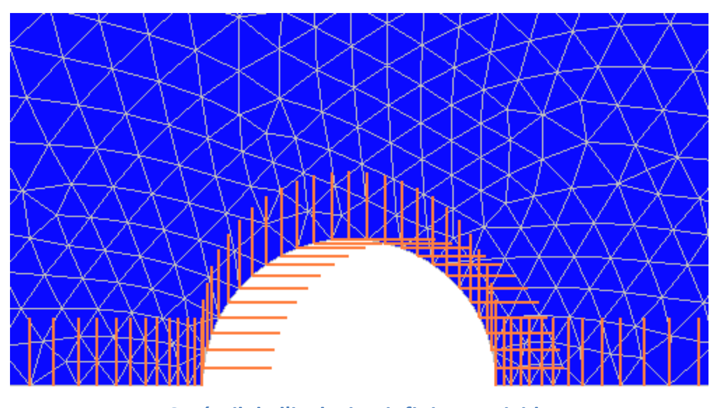
5 Courbe des contraintes de traction

Le logiciel permet aussi de connaitre la valeur d'un paramètre en un point précis ou de suivre l'évolution de celui-ci selon une ligne de coupe prédéfinie. Nous confirmons ainsi que les extrémités du trou sont très sollicitées en traction. Mais ces courbes mettent en évidence la présence d'une zone de très légère compression au somment du trou.

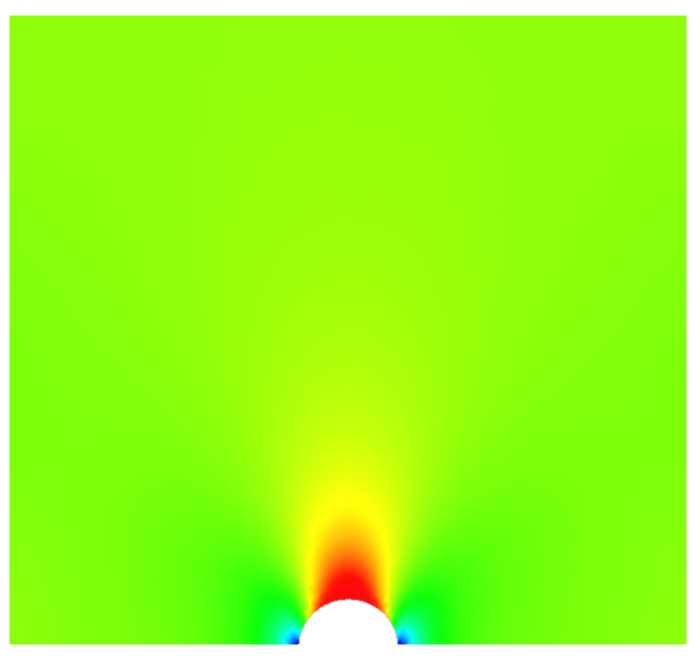


2. Plaque avec inclusion infinie en traction

La configuration de chargement et de maillage est identique à l'exemple présenté ci-dessus. Cependant l'inclusion est infiniment rigide ce qui justifie l'encastrement du trou et le blocage en translation verticale de la base de la plaque.

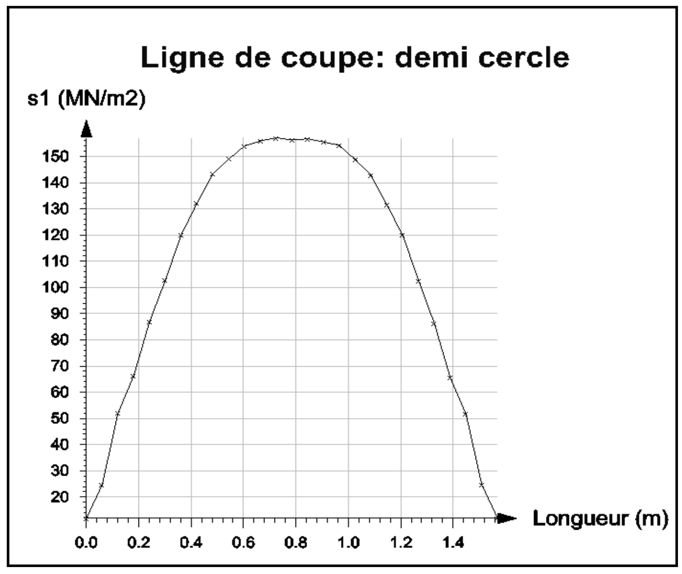


6 Détail de l'inclusion infiniment rigide



7 Mappings des contraintes de traction

On observe cette fois ci une forte concentration de contraintes de traction sur la partie supérieure de l'inclusion, alors que les extrémités du trou ne sont que très peu sollicitées.



8. Evolution de la contrainte selon l'inclusion

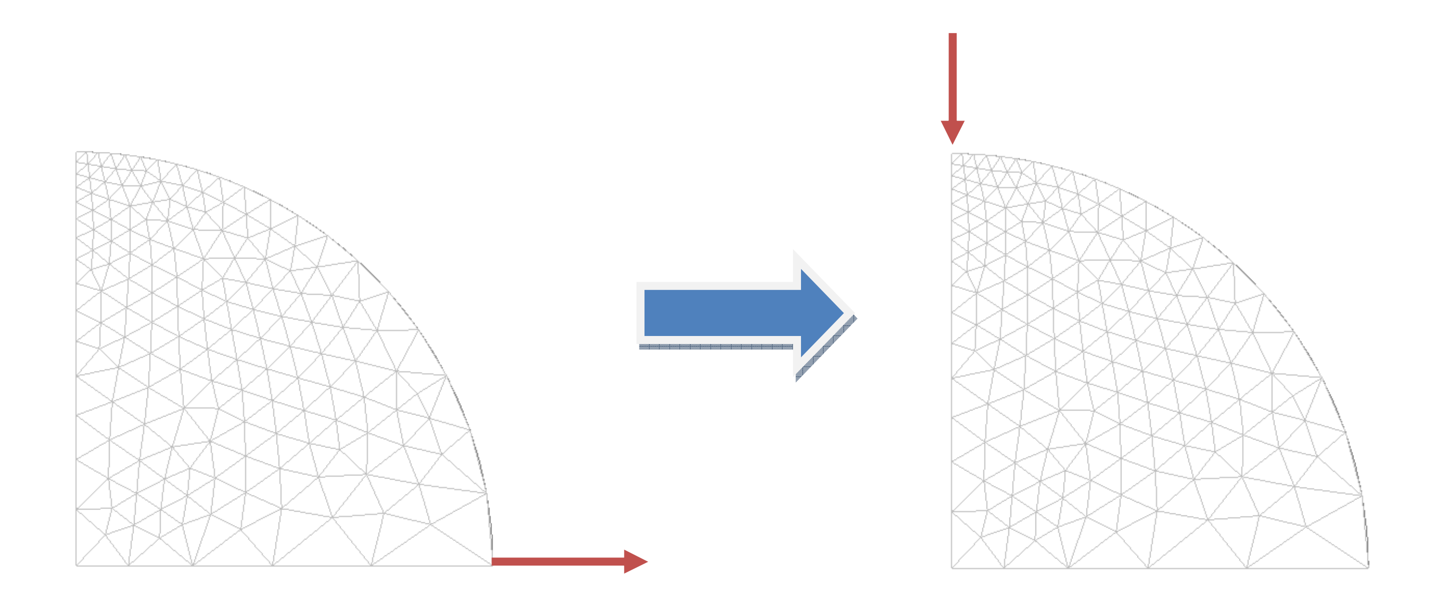
L'inclusion étant infiniment rigide, et donc indéformable, il y a répartition des efforts de traction sur l'ensemble de son pourtour.

L'inclusion rigide a donc elle aussi modifié le comportement de la plaque.

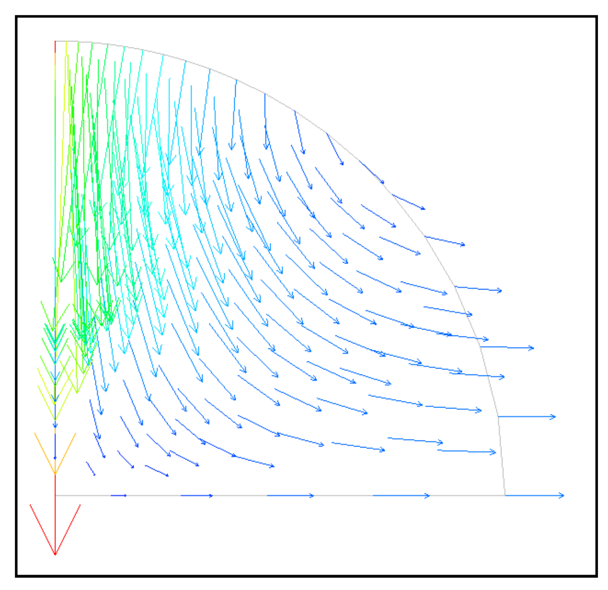


3. Justification de l'Essai Brésilien.

L'essai brésilien ou essai en traction a pour but de tester la résistance d'une éprouvette de béton en traction. Comme solliciter une éprouvette en traction est expérimentalement impossible (sceller une attache sur le cylindre modifierait ses caractéristiques mécaniques), on simule cette traction par une forte compression du cylindre.



Nous nous proposons dans cette partie de vérifier cette hypothèse simplificatrice. Nous avons donc choisi de mettre en évidence la déformation du cylindre en visualisant les vecteurs déplacements de différents points de l'éprouvette de béton.



9. Représentation des vecteurs déplacements

La partie supérieure proche du point d'application de la charge s'écrase fortement tandis que toute la partie inférieure droite aura tendance à s'écarter vers la droite.

En exerçant une pression sur le sommet de l'éprouvette, on réussit à simuler une traction latérale.

Nous constatons cependant que pour générer une légère traction nous devons exercer une compression importante.

Cependant l'hypothèse de départ semble justifiée.



4. Rideau de palplanches soumis à des excavations successives.

Nous avons choisi de développer un exemple d'application en géotechnique. La mise en œuvre de palplanches et l'excavation du sol environnant provoque un déplacement des terres et donc un changement d'état de contrainte du sol ainsi que de la palplanche. Cet exemple nous a permis d'explorer de nouvelles fonctions du logiciel, notamment la gestion du phasage des travaux ainsi que la simulation des forces de déconfinement. Nous ne présenterons dans ce paragraphe que les particularités de ces fonctions, tandis que l'exemple sera détaillé plus loin.

Gestion du phasage des travaux

Le phasage de travaux, indispensable pour la prise en compte des séquences dans la construction d'un ouvrage, est géré de manière extrêmement simple et intuitive dans CESAR-LCPC.

Le principe, qui consiste à initialiser un calcul par le résultat d'une étape de calcul précédente, est activé par le choix de la fonction « phasage » au démarrage d'une nouvelle étude. Le premier calcul, qui est souvent dédié à la génération d'un état initial géostatique avant démarrage des travaux, sert de base à toutes les phases ultérieures.

Les calculs suivants sont générés sur le même maillage et sur les mêmes hypothèses, dans lesquelles on ne viendra changer que les éléments propres à la phase de calcul donnée : application d'un nouveau chargement, activation de matériaux jusque-là inexistants désactivation de zones excavées, modification de propriétés des matériaux, etc. CESAR-LCPC stocke ainsi à l'issue de chaque phase les états de déplacements, contraintes et plasticité du modèle, qui initialiseront la phase suivante.

L'exploitation des résultats est également simple et efficace. Les résultats de toutes les phases de calcul étant contenus dans un seul fichier d'étude, il est aisé de déclarer des coupes, ou des échelles d'isovaleurs sur lesquelles on observera l'évolution d'un paramètre en cours de travaux.

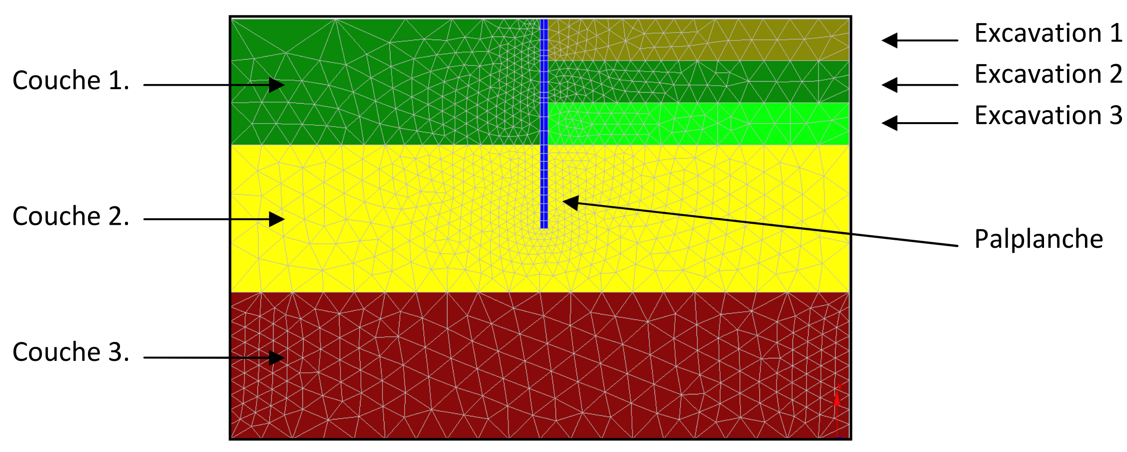
Force de déconfinement

Pour modéliser une excavation, on applique des forces de surfaces sur l'ensemble des segments devenus « externes » lors de la phase simulant l'excavation. Cette force de déconfinement est fonction des contraintes initiales ainsi que d'un Coefficient de déconfinement compris entre 0 et 1. Ce coefficient λ permet d'appliquer, dans une modélisation bidimensionnelle, une fraction des forces de déconfinement pour simuler la proximité éventuelle du front de taille.



Présentation du modèle.

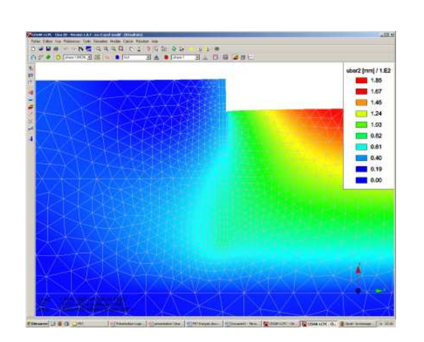
Un rideau de palplanches est enfoncé dans un sol. Nous allons procéder à trois excavations successives des terres en aval du rideau, et analyser le comportement des sols et de la palplanche.

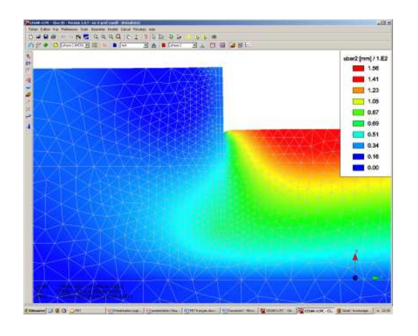


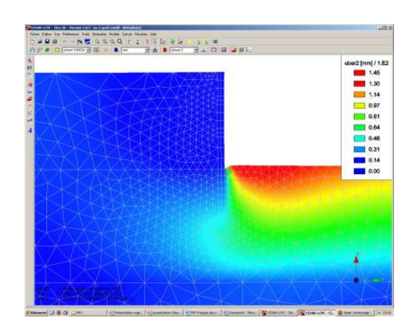
10. Modélisation du rideau de palplanches.

Séquences d'excavations.

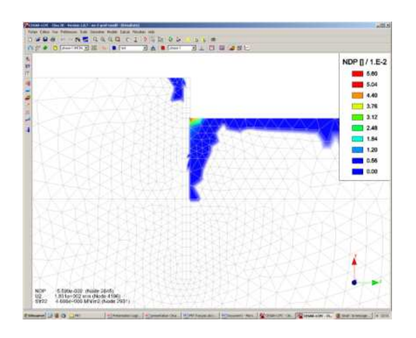
- Evolution de la norme du vecteur déplacement.

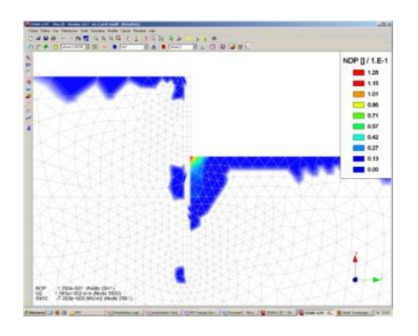


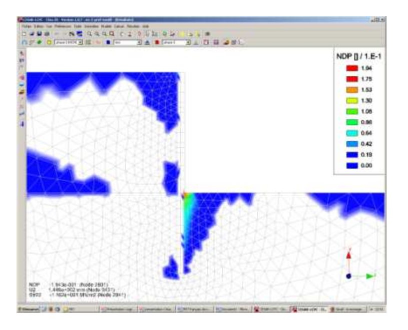




- Evolution de la déformation plastique.









On remarque ici que la partie qui se déplace le plus est toujours la partie supérieure de la zone soumise aux forces de déconfinement. Une fois libérées de la pressions des terres supérieures, les sols ont tendance à s'expandre.

En se qui concerne la déformation plastique, elle apparait toujours dans la même zone, à savoir l'interface palplanche/portion déconfinée.

III. Supports de cours réalisés.

Comme annoncé au début de ce rapport, l'un de nos objectifs premier était de fournir aux étudiants de la section Génie Civil de l'INSA de Strasbourg un support technique leur permettant de découvrir CESAR-LCPC. Ces supports serviront aussi de base pour leur formation à ce nouvel outil. Nous avons ainsi pu réaliser un diaporama de présentation générale du logiciel, ainsi qu'un manuel d'utilisation adapté aux besoins des futurs travaux pratiques de Méthodes des Eléments Finis et de Matériaux.

1. Diaporama de présentation

Il pourra servir lors du premier cours d'initiation à la modélisation sous CESAR, afin de démontrer aux étudiants l'ensemble des applications que peut revêtir ce code de calcul. Il sera agrémenté d'exemples visuels de modélisations, aussi bien issues du domaine de la construction (barrages, ponts, cathédrales…) que d'applications géotechniques telles que des murs de soutènement ou rideaux de palplanches.

Remarque : ce document est fourni en annexe.

2. Manuel d'utilisation et de prise en main.

Il sera fourni à chaque étudiant lors de la première séance de programmation, et lui permettra de découvrir de manière autonome le logiciel. Etant basé sur les connaissances nécessaires pour la réalisation des futurs travaux pratiques, ils pourront aussi délester le professeur encadrant d'un certain nombre de questions relatives aux applications les plus élémentaires du logiciels. De plus, ce manuel proposera un inventaire des problèmes les plus fréquemment rencontrés.

Remarque : ce manuel est fourni en annexe.



Conclusion.

Le Projet de Recherche Technologique doit permettre à l'étudiant de se mettre en situation de recherche, à savoir être face à une problématique et découvrir comment mener à bien les études nécessaires à sa résolution.

Dans notre cas le projet a été parfaitement conforme à ces attentes : la découverte d'un logiciel du calibre de CESAR-LCPC et sa maitrise, souvent menées par tâtonnements et échecs en tous genres s'apparentent totalement à des actions de recherche. La complexité mais surtout l'incroyable étendue des capacités de ce code de programmation a été à la fois un frein et un moteur pour notre étude. Nous ne comptions plus les modélisations restées infructueuses, les messages d'erreurs et autres ennuis informatiques. En effet la relative impression d'aisance due à l'interface assez intuitive a vite été estompée par la multitude d'actions nécessaires à une modélisation correcte.

Nous avons cependant pu rester impliqués dans ce projet, notre curiosité nous poussant à continuer de découvrir les rouages et subtilités de cet outil. Notre professeur encadrant a aussi pu, lors de ses interventions ou des diverses réunions d'avancement, nous apporter une aide en nous offrant des pistes de réflexion ou en résolvant certains problèmes de programmation.

Notre principal souci fut en fait d'ordre purement logistique : le logiciel n'a correctement fonctionné qu'à partir de la Toussaint, ce qui a occasionné un fort contretemps dans le déroulement de notre étude. Il n'est d'ailleurs toujours pas complètement opérationnel, et les dysfonctionnements sont encore (trop) fréquents.

Malgré ces points négatifs, nous retiendrons de ce projet l'opportunité offerte de découvrir et se familiariser avec un nouveau logiciel, d'applications directes dans les domaines du génie civil et de la construction, et l'enrichissement retiré. De ce point de vue, nous le considérons comme une totale réussite.